

激光深穿透焊接的理论模型

廖健宏

(华南师范大学量子电子学研究所, 广州, 510631)

摘要: 我们把激光能量当作线状移动热源, 分析了激光深穿透焊接的热循环, 并由此导出焊缝深度与焊缝宽度之乘积随焊接速度的变化, 其理论值与实际值十分接近。

关键词: 激光深穿透焊接 小孔 线状热源

Mathematical analysis about deep penetration laser welding

Liao Jianhong

(Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou, 510631)

Abstract: we take the laser beam energy as a line heat source to analyze the temperature field distribution $T = \{ (p/hv) / [2(\pi \epsilon_0 Q)^{1/2}] \} \exp[-y^2 / (4\alpha t)]$ of the deep penetration laser welding, and emphasized the relation $Bh = 2 / (\pi \epsilon_0) (1/c\alpha T_m) (p/v)$ of the welding speed v , and the depth B and width h of the welded seam. The experimental results show that the theoretical analysis are well agreement with practical operation.

Key words: deep penetration laser welding key hole line heat source

一、引言

激光深穿透焊接由于小孔的形成, 激光能量可直接进入小孔深处, 而不必由热传导从金属表面向内部传递, 显然这种焊接与激光热传导焊接不同, 不能把激光能量当作点状移动热源来处理。与熔池区相比, 考虑到小孔的孔径较小, 可以把激光能量当作是小孔深度方向上的一个移动线状热源, 从这一点出发, 我们通过求解热传导基础方程, 分析了激光深穿透焊接的热循环, 并由此导出的焊缝深度与宽度之积和实际结果有很好的近似。

二、激光深穿透焊接小孔的形成

激光深穿透焊接由于激光功率密度较高 ($10^6 \sim 10^7 \text{W/cm}^2$), 高功率密度的激光使金属表面达到气化温度。金属表面气化一旦开始, 此时表面因气化吸热使其温度不能升高, 使得表面下层金属的温度反而高于表面金属, 在获得迅速温升时, 足以引起表面下金属的气化。气化的金属产生很高的蒸气压, 使相当数量的金属液滴和颗粒从激光照射表面喷溅出来, 形成一小孔, 见图 1。小孔形成后被一层熔化金属所包围, 熔化金属的流动和表面张力都力图消除小孔, 而由激光气化金属所产生的蒸气却支撑着小孔, 当激光束以一定速度相对金属运动时, 小孔及熔化金属也以这个速度向前移动, 并处于一个动力学稳态。小孔形成后, 后续

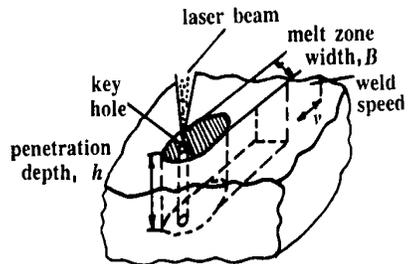


Fig. 1 The scheme of the deep penetration welding

的激光能量就直接进入小孔, 均布于小孔深度方向的激光能量又通过热传导从小孔向四周金属传递。由于小孔的尺寸相对于熔池区较小, 我们完全可以把激光能量当作是小孔深度方向上的一个移动线状热源来处理。

三、激光深穿透焊接的理论计算模型

对于线状热源, 如果不考虑金属表面的热能损耗, 则金属内热流动可近似为二维, 二维热传导基础方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\varepsilon}{c\rho}(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) = \alpha \cdot \nabla^2 T \quad (1)$$

式中, T 为金属内温度分布; ε 为金属热传导系数; c 为金属比热; ρ 为金属密度; α 为金属导热系数。

为了便于求解, 根据实际焊接情况, 我们作如下假定: 1. 因焊缝区相对于焊接金属的尺寸较小, 可假定焊接金属为半无限大物体; 2. 激光能量全部进入小孔, 在金属表面的损耗极少, 可假定半无限大金属表面为绝热面; 3. 相及组织转变时所产生的潜热与激光能量相比可忽略不计; 4. 金属的热物理性质 (ε, c) 随温度虽有变化, 但变化不大, 可假定焊接时 ε, c 为常数。

有了以上假定, 对于瞬时线状热源, 方程(1)的特解为:

$$T_{瞬}(r, t) = [(\alpha/h)/(4\pi c\rho\alpha t)] \exp[-r^2/(4\alpha t)] \quad (2)$$

式中, α 为金属获得的瞬时激光能量; h 为小孔深度; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

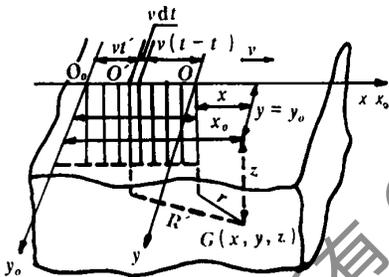


Fig. 2 Geometry of moving line heat source on the boundary of metal

实际激光深穿透焊接时, 激光热源是连续移动的, 也即是连续移动的线状热源, 可以看作是无数个瞬时线状热源在不同瞬时和不同位置上的共同作用, 利用累计原理, 下面我们从瞬时线状热源的结果来导出连续移动线状热源的温度场分布。

图2是半无限大金属上移动线状热源坐标系, 激光束移动方向与 x 轴正方向一致, 移动速度为 v , 激光功率为 P 。设焊接金属初始温度为 0°C , O_0 是激光开始作用的点, 对应坐标系 (x_0, y_0, z_0) , 当激光焊接经过时间 t 后, 激光热源到达 O 点, O 点对应坐标系 (x, y, z) , $T(x_0, y_0, t)$ 为金属内任一点 $G(x, y, z)$ 的温度分布。

激光热源到达金属内任一点 O' , 且在 dt' 时间内的能量为 $d\theta$: $d\theta = P dt' \quad (3)$

该 $d\theta$ 可使 G 点升高温度 dT , 则由(2)式有:

$$dT(x_0, y_0, t - t') \text{ 度向 } \frac{(P/h) dt'}{4\pi c\rho\alpha(t-t')} \exp - \frac{R'^2}{4\alpha(t-t')} \quad (4)$$

对(4)式进行时间积分, 可以得到任一点 $G(x, y, z)$ 的温度分布:

$$T(x_0, y_0, t) = \int_{t'=0}^t dT(x_0, y_0, t-t') \quad (5)$$

式中, $R'^2 = (x_0 - vt')^2 + y_0^2$ 。

经过适当的坐标变换, (5)式可变为:

$$T(x, y, t) = \frac{P/h}{4\pi c\rho\alpha} \exp - \frac{vx}{2\alpha} \int_0^t \frac{dt''}{t''} \exp - \frac{v^2 t''}{4\alpha} - \frac{r^2}{4\alpha t''} \quad (6)$$

(6)式就是激光深穿透焊接时金属内的温度分布,这个式子比较复杂,我们借助于计算机解出了其等温线分布,见图3。

计算时,焊接金属材料选 18CrMnTi,其物理参数: $\epsilon = 0.38\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$, $c\rho = 4.75\text{J}/\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ 。

另外, $P = 3.0\text{kW}$, $h = 4\text{mm}$, $v = 15\text{mm}/\text{s}$, $t = 10\text{s}$ 。

从图3可以看出, 1200°C 等温线基本上不随 x 变化,这说明沿着焊接运动方向已不存在温度梯度,激光能量只能在金属中横向传播。焊接速度愈大,这种效应愈明显。

只要激光焊接速度大于 $15\text{mm}/\text{s}$,我们就不必考虑激光热量沿焊接方向的传递,这样,激光线状热源就可简化为面状热源在矩形杆中的瞬时作用,则其温度分布的解为:

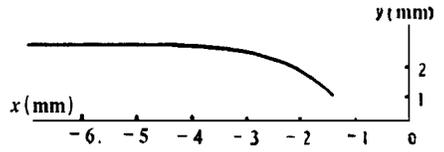


Fig. 3 The 1200°C isothermal curve, here point $x = -1$ corresponds the point O of Fig. 2

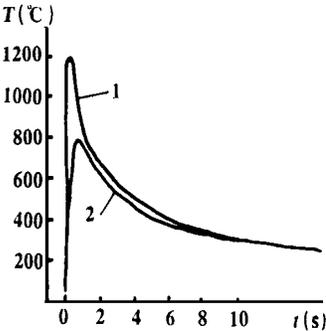


Fig. 4 The temperature distribution under the approximation condition of high welding speed

峰值温度能达到金属熔点 T_m 的点都应包含在焊缝区,这时所对应的 y 值也即离开激光热源的垂直距离,就是焊缝的半宽度。

$$T = [(P/hv)/2(\pi\epsilon\rho t)^{1/2}] \exp[-y^2/(4\alpha)] \quad (7)$$

图4是(7)式的曲线,1和2分别为金属上不同点对应的温度随时间的变化,从图中可以看出,激光深穿透焊接的加热速度极快,而且离热源越近的点,其加热速度更快,而在某一峰值温度的保温时间又非常短,这就容易在焊缝区形成马氏体组织。事实上,我们对焊后的材料进行检测,其焊缝区组织均为马氏体。

对(7)式,令 $\partial T/\partial t = 0$,可得到焊缝峰值温度横向 y 的分布:

$$T_{\max} = [P/(hv)] / (2\pi\epsilon c\rho y) \quad (8)$$

$$B \cdot h = 2/(\pi\epsilon) \cdot [1/(c\rho T_m)] \cdot (P/v) \quad (9)$$

(9)式说明,焊缝深度与宽度乘积正比于激光功率,反比于焊接速度,按照(9)式,我们算出了在不同焊接速度下 $B \cdot h$ 值的大小,并与试验值相比,两者有很好的近似,见附表。

比较附表中 $B \cdot h$ 理论值和试验值,不难看出,试验值较理论值偏小,我们分析,这是由于激光深穿透焊接所产生的等离子体对激光能量屏蔽所致。虽然在焊接过程中,我们采取侧吹氩气来消除等离子体,但多少总有一些等离子体残留在小孔上方,屏蔽了部分激光能量,使得实测的 $B \cdot h$ 值比理论计算值略小。

参 考 文 献

- 1 Arata Y, Abe N, Oda T. Proc of ICALCO, 1983; 38: 59
- 2 Mazumder J, Steen W M. J A P, 1980; 51: 941
- 3 陈伯 . 金属焊接性基础. 北京: 机械工业出版社, 1982: 3

* * *

作者简介: 廖健宏,男,1965年1月出生。硕士研究生,工程师。现主要从事激光与物质相互作用方面的研究工作。